УДК 621.372.51.049.774:658.512.26:004.92

ИНТЕГРИРОВАННАЯ СРЕДА «ВИЗУАЛЬНОГО» ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРРЕКТИРУЮЩИХ И СОГЛАСУЮЩИХ ЦЕПЕЙ МОНОЛИТНЫХ СВЧ УСТРОЙСТВ

Ф.И. Шеерман, Л.И. Бабак, Д.А. Зайцев

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
E-mail: sfi1493@ms.tusur.ru, babak@post.tomica.ru

Предлагается интерактивная «визуальная» процедура проектирования корректирующих и согласующих цепей монолитных СВЧ устройств, основанная на методике преобразования моделей. Рассмотрена реализация процедуры в интегрированной среде, объединяющей программу «визуального» проектирования пассивных цепей LOCUS-MMIC и систему проектирования СВЧ устройств Microwave Office. На примере синтеза монолитной согласующей цепи продемонстрирована эффективность предложенной процедуры.

1. Введение

Один из путей совершенствования современных радиоэлектронных систем и устройств состоит в применении СВЧ монолитных интегральных схем (МИС). Важной проблемой при проектировании СВЧ МИС является синтез корректирующих (КЦ) и согласующих (СЦ) цепей, входящих в состав активных СВЧ устройств.

Сложность синтеза монолитных интегральных (МИ) цепей обусловлена тем, что пассивные МИ-элементы (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, линии передачи) имеют потери и паразитные параметры, влияющие на характеристики цепи. Однако существующие методы разрешают синтезировать КЦ и СЦ лишь на идеальных элементах. В частности, в [1, 2] разработана интерактивная процедура «визуального» проектирования КЦ и СЦ.

В настоящей статье предлагается аналогичная «визуальная» процедура проектирования монолитных КЦ и СЦ. Она основана на описанном в [3] подходе к синтезу МИ-цепей, состоящем в преобразовании моделей пассивных элементов. Процедура позволяет учесть потери и паразитные явления в монолитной цепи непосредственно при выборе структуры и параметров элементов, благодаря этому сокращается трудоемкость и повышается точность проектирования МИС. Рассмотрена реализация процедуры в интегрированной среде, объединяющей специализированную программу «визуального» проектирования монолитных КЦ и СЦ LOCUS-MMIC и систему проектирования СВЧ устройств Microwave Office 5.53 (MWO).

2. Описание процедуры

Рассмотрим вначале постановку задач проектирования КЦ и СЦ. При проектировании двухполюсной КЦ исходной является частотная зависимость импеданса $Z_0(j\omega)$, заданная в численном виде на ряде дискретных точек ω_k $(k=\overline{1,m})$ частотного диапазона $\omega\in[\omega_L, \omega_U]$, $\omega_1=\omega_L$, $\omega_m=\omega_U$. Требуется синтезировать двухполюсную цепь, воспроизводящую с необходимой точностью зависимость $Z_0(j\omega) = R_0(\omega) + jX_0(\omega)$ в диапазоне $[\omega_L, \omega_U]$. Точность воспроизведения характеристики $Z_0(j\omega)$ может быть задана путем указания максимально допустимых абсолютных уклонений $(\Delta R, \Delta X)$ вещественной и мнимой частей импеданса цепи $Z(j\omega)=R(\omega)+jX(\omega)$ от исходных зависимостей $R_0(\omega)$ и $X_0(\omega)$ в точках ω_k:

$$R_0(\omega_k)-\Delta R(\omega_k)\le R(\omega_k)\le R_0(\omega_k)+\Delta R(\omega_k);$$
$$X_0(\omega_k)-\Delta X(\omega_k)\le X(\omega_k)\le X_0(\omega_k)+\Delta X(\omega_k);\ k=\overline{1,m}. \quad (1)$$

При проектировании СЦ задача состоит в синтезе реактивной четырехполюсной цепи, реализующей с заданным допуском требуемую частотную характеристику передачи мощности $G(\omega)$ от генератора с активным сопротивлением R_S в нагрузку с заданным импедансом $Z_L(j\omega)$ (рис. 1), причем уровень передаваемой мощности должен быть максимальным. Предполагается, что импеданс согласуемой нагрузки $Z_L(j\omega)$ задан в численном виде на ряде фиксированных частот ω_k $(k=\overline{1,m})$ рабочего диапазона $\omega\in[\omega_L, \omega_U]$, $\omega_1=\omega_L$, $\omega_m=\omega_U$. Требования к коэффициенту передачи цепи $G(\omega)$ задаются также численно в виде двухсторонних ограничений, определяющих диапазон возможных значений $G(\omega)$ на частотах ω_k:

$$G^-(\omega_k)\le G(\omega_k)\le G^+(\omega_k),\ k=\overline{1,m}, \quad (2)$$

где $G^-(\omega_k)$ и $G^+(\omega_k)$ – граничные значения коэффициента передачи $G(\omega_k)$ на частотах ω_k.

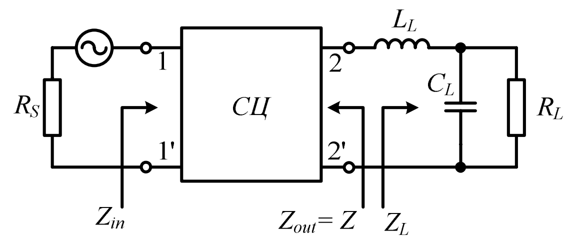


Рис. 1. *Задача согласования комплексной нагрузки с активным сопротивлением генератора*

Проектирование КЦ и СЦ основано на методе «областей» [4]. При этом вначале на каждой из частот ω_k $(k=\overline{1,m})$ рабочего диапазона строятся области допустимых значений (ОДЗ) E_k на плоскости импеданса цепи Z, отвечающие ограничениям (1) или (2). Далее синтезируется двухполюсная цепь таким образом, чтобы ее импеданс $Z(j\omega)$ на частотах ω_k попадал в соответствующие ОДЗ E_k:

$$Z(j\omega_k) \in E_k,\ k=\overline{1,m}.$$

При проектировании СЦ двухполюсная цепь выбирается в виде реактивного четырехполюсника, нагруженного на сопротивление генератора R_S (рис. 1).

Интерактивная «визуальная» процедура проектирования КЦ и СЦ на идеальных элементах [1, 2] включает два шага.

1. Выбор структуры КЦ (СЦ), исходя из расположения ОДЗ на плоскости импеданса. При этом пользователь на экране компьютера одновременно наблюдает сами ОДЗ, а также библиотеку типовых структур цепей и их годографов импеданса или проводимости. В результате пользователь выбирает несколько структур цепей, годограф которых может попасть в заданные области.
2. Расчет элементов КЦ (СЦ) с выбранной структурой. Пользователь может управлять формой годографа, перемещая с помощью «мыши» опорную точку годографа Z_{ref} на одной из частот и изменяя с помощью тюнера величины некоторых (управляемых) элементов цепи. Таким образом он добивается попадания точек годографа на других частотах в соответствующие ОДЗ. Если этого удается добиться, то задача проектирования КЦ (СЦ) выполнена, в противном случае необходимо выбрать другую структуру цепи.

Предлагаемая аналогичная процедура для визуального проектирования монолитных КЦ и СЦ основана на методе преобразования моделей пассивных элементов [3]. Данный метод позволяет, используя существующие процедуры синтеза цепей на идеальных элементах, осуществить синтез устройств на МИ-элементах. При этом могут быть применены любые типы моделей, разрешающие с необходимой точностью описать монолитные элементы – например, модели в виде эквивалентных схем, многомерных полиномов, нейросетей и др., модель должна лишь отвечать требованию достаточного быстродействия.

Процедура состоит в следующем. Для выбранной идеальной цепи (КЦ на идеальных элементах) автоматически строится соответствующая (ассоциированная) монолитная интегральная (МИ) цепь [3]. В ней каждый идеальный элемент (сопротивление, индуктивность, емкость, идеальная линия передачи) заменяется моделью соответствующего МИ-элемента (например, в виде эквивалентной схемы). По известным электрическим параметрам идеальных элементов осуществляется автоматический расчет геометрических размеров МИ-элементов [5], эти размеры служат параметрами моделей МИ-элементов. Таким образом, параметры моделей элементов МИ-цепи оказываются связанными с величинами элементов идеальной цепи. Кроме моделей МИ-элементов, МИ-цепь включает также модели соединительных линий (микрополосковые линии – МПЛ, тройники) и заземляющих отверстий (VIA) в положке.

На экране компьютера вместе с ОДЗ отображаются одновременно два взаимосвязанных годографа – идеальной цепи и соответствующей ей МИ-цепи. Если изменять форму годографа идеальной цепи, варьируя ее элементы, то будет изменяться и форма годографа МИ-цепи.

Первоначально пользователь по ОДЗ иммитанса выбирает структуру идеальной КЦ, тем самым задается и структура ассоциированной МИ-цепи. Процесс визуального определения элементов МИ-цепи заключается в том, что пользователь, управляя формой годографа *идеальной* цепи, добивается попадания в ОДЗ точек годографа *монолитной* цепи. При этом он может быстро оценить, возможно ли с помощью МИ-цепи выбранной структуры удовлетворить указанному требованию, и при необходимости взять другую структуру цепи. Таким образом, влияние потерь и паразитных параметров в МИ-элементах учитывается при выборе как структуры, так и размеров элементов монолитной КЦ.

3. Проектирование монолитных корректирующих и согласующих цепей на основе интеграции программ LOCUS и MWO

Рассмотренная выше «визуальная» процедура проектирования КЦ и СЦ на идеальных элементах реализована в программе LOCUS [6]. Предлагаемый подход к синтезу монолитных КЦ и СЦ может быть осуществлен двумя способами. В первом случае в программе LOCUS реализуются в виде подпрограмм модели всех монолитных элементов для выбранной технологии изготовления МИС. Во втором случае программа LOCUS интегрируется с одной из распространенных программных систем проектирования СВЧ устройств, и используются содержащиеся в последней готовые модели элементов. Преимуществом первого способа является независимость программы LOCUS от других программ и возможность ее самостоятельного использования для проектирования МИС. Однако задача построения достаточно точных моделей МИ-элементов требует значительных затрат времени и труда и должна решаться отдельно для каждой технологии. Поэтому в данной работе был выбран второй способ.

В качестве моделирующей системы использовалась популярная среда разработки (Design Environment) СВЧ устройств MWO. Такой выбор обусловлен тем, что данная система обладает большим спектром возможностей, в частности, в ней реализованы удобный графический интерфейс, различные методы линейного и нелинейного анализа и оптимизации, содержится множество моделей СВЧ элементов, предусмотрена возможность подключения библиотек моделей монолитных элементов для нескольких технологий. Кроме того, среда является достаточно гибкой и позволяет расширять и дополнять ее возможности. Это реализуется с использованием технологии COM-Automation – стандартного механизма, позволяющего интегрировать программы-приложения, а также автомати-

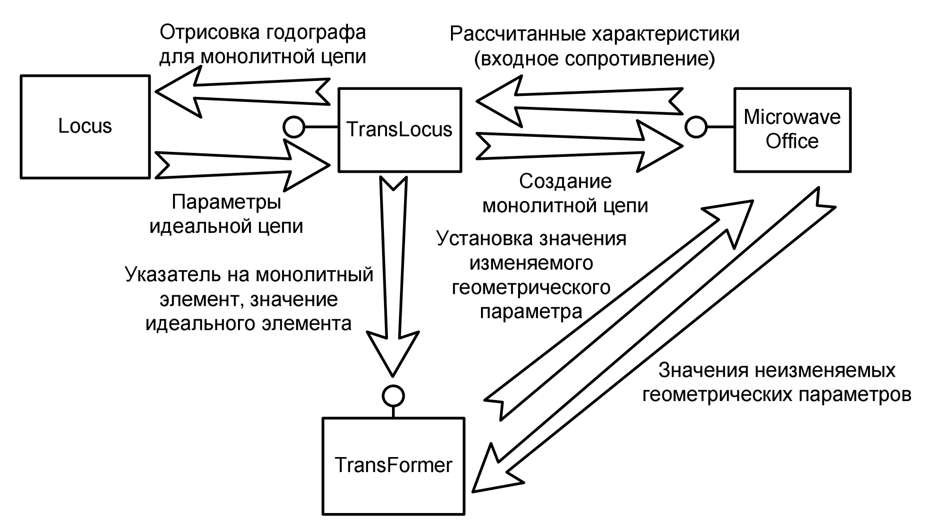


Рис. 2. *Схема взаимодействия среды моделирования MWO и программы LOCUS*

зировать работу отдельных приложений. Благодаря этой технологии программа, называемая клиентом (например, специализированная программа синтеза цепей), может получить доступ к внутренним объектам другого приложения, называемого сервером (в нашем случае – MWO). Клиент может вызвать различные методы, реализованные в приложении-сервере.

Для осуществления проектирования монолитных КЦ и СЦ нами была осуществлена интеграция программ LOCUS и MWO. С этой целью программа LOCUS дополнена специальными модулями TransLOCUS и TransFORMER. Посредством данных модулей и осуществляется взаимодействие среды моделирования MWO и программы LOCUS, рис. 2.

Из программы LOCUS в модуль TransLOCUS поступают параметры идеальной цепи: номер схемы цепи и номиналы элементов. Предварительно пользователь должен выбрать для каждого идеального элемента его физическую реализацию. Например, для идеальной индуктивности это может быть реализация в виде круглой или квадратной спирали либо отрезка МПЛ.

Модуль TransLOCUS, используя технологию взаимодействия приложений COM-Automation, вызывает среду MWO и формирует в ней монолитный аналог цепи, используя вместо идеальных элементов соответствующие модели монолитных элементов. Назовем эти элементы изменяемыми (имеется в виду, что их параметры будут изменяться вместе с изменением элементов идеальной цепи). Кроме того, автоматически добавляются соединительные линии, различные неоднородности (тройники, повороты), заземляющие отверстия и т. д. – неизменяемые элементы.

По значениям идеальных элементов модуль TransLOCUS вычисляет геометрические параметры МИ-элементов. Для этого он вызывает универсальный модуль TransFORMER. На вход последнего модуля поступает указатель на МИ-элемент в среде MWO и значение соответствующего ему идеального элемента. Модуль по указателю считывает неизменяемые геометрические параметры МИ-элемента, с использованием формул преобразования [5] вычисляет значение изменяемого геометрического параметра и устанавливает рассчитанное значение в среде MWO. При этом у пользователя есть возможность изменить параметры монолитного элемента. Например, для спиральной индуктивности он может установить ширину проводников и ширину зазора, а длина будет вычисляться автоматически. Для конденсатора он может установить ширину, длина будет вычисляться и т. д.

Таким образом формируется первоначальная топология монолитной цепи, которая отображается в MWO. Далее пользователь может сам, непосредственно в среде MWO, отредактировать конфигурацию МИ-цепи: добавить, удалить элементы или изменить их параметры.

После получения топологии модуль TransLOCUS запускает процедуру моделирования МИ-цепи в среде MWO. В результате вычисляются и выводятся в виде графиков необходимые характеристики монолитной цепи. Рассчитанные значения импеданса МИ-цепи передаются в программу LOCUS, где по ним строится соответствующий годограф.

В процессе проектирования пользователь в программе LOCUS изменяет значения элементов и положение опорной точки годографа идеальной цепи. При этом он в режиме реального времени одновременно наблюдает соответствующие изменения формы обоих годографов, графиков характеристик и топологии МИ-цепи. Таким образом, в любой момент времени пользователь может контролировать как характеристики монолитной цепи с учетом паразитных параметров элементов, так и ее геометрию, это значительно упрощает проектирование МИС.

Модернизированный вариант программы LOCUS получил название LOCUS-MMIC. На рис. 3

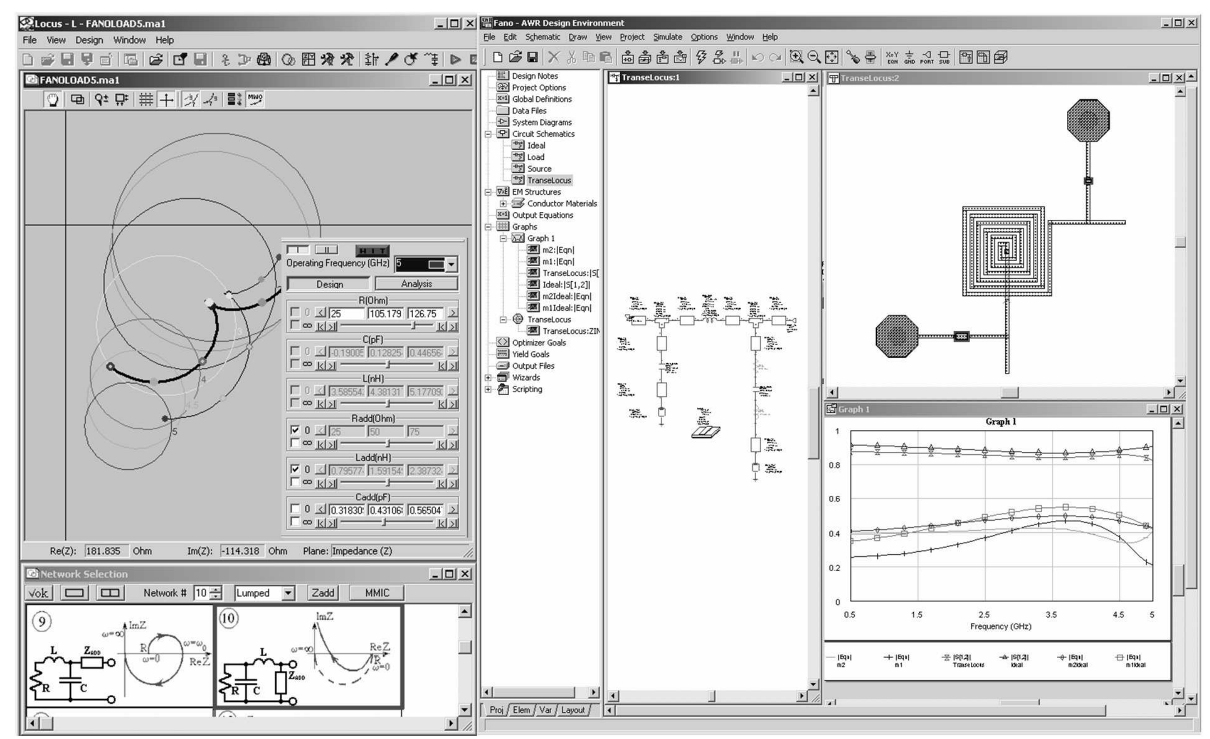


Рис. 3. *Рабочая среда программ LOCUS-MMIC и MWO*

представлен вид рабочей среды программ LOCUS-MMIC и MWO при совместном использовании.

Особенностью визуального проектирования монолитных СЦ является то, что при наличии потерь в цепи (в отличие от реактивных СЦ) отсутствует однозначная связь между коэффициентами отражения на входе (m_1), выходе (m_2) и коэффициентом передачи по мощности G. Поэтому попадание годографа выходного сопротивления цепи $Z(j\omega)$ в ОДЗ не гарантирует получения необходимых уровней согласования на входе и коэффициента передачи. Для преодоления указанной трудности в среде MWO следует графически выводить частотные характеристики m_1, m_2 и G. Если характеристики m_1, G монолитной цепи, полученной путем размещения годографа $Z(j\omega)$ в ОДЗ, не устраивают пользователя, он может дополнительно подстроить элементы идеальной цепи, наблюдая частотные зависимости этих характеристик.

4. Проектирование монолитной согласующей цепи

В качестве примера рассмотрим решение известной задачи Фано [7]: синтезировать цепь для согласования трехэлементной *RLC*-нагрузки (рис. 1) с резистивным сопротивлением генератора в полосе частот f=0…5 ГГц (в задаче Фано для большей наглядности элементы нагрузки денормированы к уровню импеданса Z_0=50 Ом и частоте $2\pi\cdot 5\cdot 10^9$ Гц). Значения элементов нагрузки: L_L=3,66 нГн, C_L=0, 76 пФ, R_L=50 Ом. В рассматриваемом случае сопротивление генератора R_S может варьироваться для улучшения характеристик цепи.

Спроектируем монолитную СЦ при использовании 0,2 мкм GaAs технологии ED02AH фирмы OMMIC (Франция). С этой целью в среду MWO включим имеющуюся библиотеку элементов для указанной технологии. Основной целью проектирования монолитной СЦ будем считать получение равномерного и максимально возможного коэффициента передачи в полосе согласования. Решение данной задачи для реактивных цепей на идеальных элементах с помощью «визуального» подхода приведено в [7].

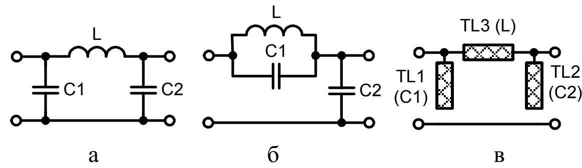


Рис. 4. *Идеальные цепи-прототипы*

По результатам решения задачи для реактивной СЦ [7] выберем ограничение на выходной коэффициент отражения $m_2 \le m_2^+$=0,4, для реактивной цепи это соответствует ограничению на коэффициент передачи $G_T \ge G_T^+$=0,84. На рис. 3 показаны ОДЗ на плоскости выходного импеданса цепи Z, полученные программой LOCUS-MMIC для $m_2 \le 0{,}4$ на фиксированных частотах полосы пропускания.

При проектировании монолитной СЦ за основу возьмем идеальные цепи-прототипы, полученные в [7] (рис. 4). Сосредоточенная Цепь 1 (рис. 4, *а*) имеет классическую лестничную структуру. Сосредоточенная Цепь 2 (рис. 4, *б*) является нетрадиционной и содержит колебательный контур. В ра-

спределенной Цепи 3 (рис. 4, *в*) вместо сосредоточенных конденсаторов используются холостоходные шлейфы.

Соответствующие реализации монолитных СЦ, построенные в среде MWO, показаны на рис. 5. Вместо идеальных элементов в них используются квадратные спиральные индуктивности (L), МДМ-конденсаторы (C) и разомкнутые отрезки МПЛ (TL). В состав цепей входят также соединительные линии, тройники и сквозные заземляющие отверстия. Заметим, что Цепь 3 с холостоходными шлейфами (рис. 5, *в*) проще в изготовлении, так как позволяет исключить целый ряд операций, связанных со сквозными заземляющими отверстиями.

С помощью рассмотренной «визуальной» процедуры были найдены оптимальные значения элементов идеальных цепей-прототипов и соответствующие геометрические параметры монолитных СЦ. Топологии полученных цепей изображены на рис. 6. В табл. 1 приводятся сравнительные характеристики СЦ на идеальных элементах [7], а в табл. 2 – монолитных СЦ. В таблицах приняты следующие обозначения: $m_{1\max}$, $m_{2\max}$ – максимальные значения модулей коэффициента отражения на входе и выходе цепи в полосе согласования; $G_{\min}$ – минимальное значение коэффициента передачи по мощности СЦ в полосе согласования; $\Delta G=(G_{\max}-G_{\min})/G_{\min}$ – неравномерность частотной характеристики передачи мощности, где $G_{\max}$ – максимальная величина коэффициента передачи в полосе согласования. На рис. 7 приведены частотные зависимости коэффициента передачи монолитных СЦ.

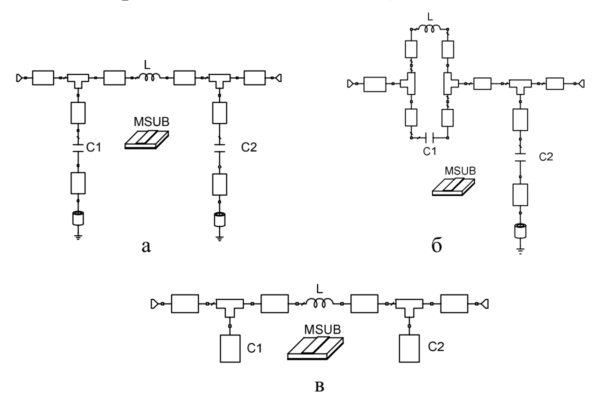


Рис. 5. *Монолитные согласующие цепи*

Интересно, что результаты сравнения представленных структур для идеальных и реальных цепей прямо противоположны. В частности, среди идеальных СЦ наибольший коэффициент передачи ($G_{\min}$) имеет Цепь 2. В то же время монолитная ее реализация обладает наихудшим значением $G_{\min}$, хотя и наилучшими значениями коэффициентов отражения по входу и выходу. Для цепей на идеальных элементах распределенная Цепь 3 обеспечивает самый низкий коэффициент передачи, а монолитная реализация, наоборот, самый высокий. Анализ характеристик монолитных СЦ позволяет заключить, что наименьшие потери за счет поглощения мощности имеет Цепь 3, это можно объяснить отсутствием заземляющих отверстий.

«Визуальная» процедура позволяет в процессе проектирования сразу определить габариты монолитных СЦ (табл. 2). Наименьшими габаритами обладает Цепь 2 (за счет малой величины индуктивности L), а наибольшими – Цепь 3.

Таблица 1. *Характеристики идеальных согласующих цепей*

Цепь	Рис.	Значения элементов	$G_{\min}$	ΔG	$m_{1\max}=m_{2\max}$
1	4, *а*	C1=0,243 пФ; C2=0,61 пФ; L=4,72 нГн; R_S= 110 Ом	0,8499	0,0508	0,387
2	4,*б*	C1=0,87 пФ; C2=0,54 пФ; L=0,92 нГн; R_S= 100 Ом	0,8814	0,0362	0,344
3	4, *в*	TL1: Z=75 Ом, l=19,2°; TL2: Z=50 Ом, l=36,4°; TL3: Z=125 Ом, l=96,4°; R_S =120 Ом	0,8050	0,0791	0,442

Таблица 2. *Характеристики монолитных согласующих цепей*

Цепь	Рис.	Значения элементов идеальных цепей-прототипов	$G_{\min}$	ΔG	$m_{1\max}$	$m_{2\max}$	Габариты, мкм
1	5, *а*, 6, *а*	C1=0,126 пФ; C2=0,43 пФ; L=4,38 нГн; R_S=105 Ом	0,687	0,12	0,465	0,427	710×480
2	5, *б*, 6, *б*	C1=0,19 пФ; C2=0,37 пФ; L=1,9 нГн; R_S=105 Ом	0,668	0,2	0,432	0,426	610×490
3	5, *в*, 6, *в*	C1=0,22 пФ; C2=0,5 пФ; L=4,9 нГн; R_S=108 Ом	0,703	0,07	0,491	0,427	1400×1180

Заключение

Приведенный пример показывает эффективность процедуры «визуального» проектирования монолитных КЦ и СЦ в разработанной интегрированной среде. При ее использовании проектировщик может, наряду с определением структуры и значений элементов, в режиме реального времени оценить электрические характеристики монолитной цепи с учетом паразитных эффектов, а также особенности топологии и габариты. Процедура позволяет быстро сравнить характеристики монолитных КЦ и СЦ с разными структурами и (или) топологиями и выбрать лучший вариант. Это значительно уменьшает трудоемкость и повышает качество проектирования МИС.

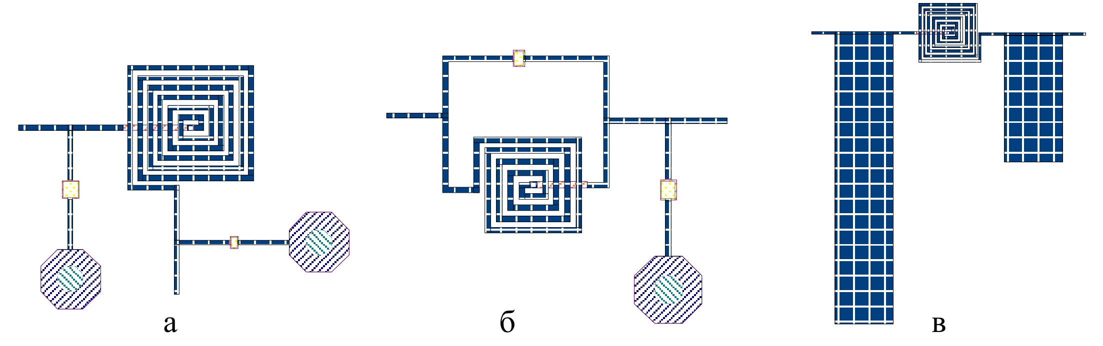


Рис. 6. Топология монолитных согласующих цепей

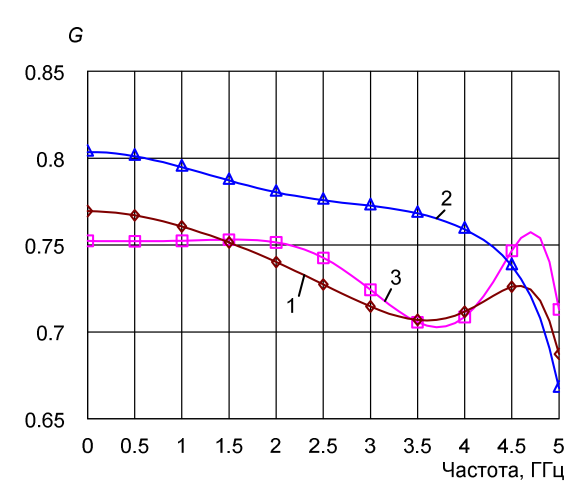


Рис. 7. Частотные характеристики передачи мощности СЦ на монолитных элементах

Пример свидетельствует также о неоптимальности распространенного подхода к проектированию МИС, когда вначале выбирается (синтезируется) цепь на идеальных элементах, затем по ней строится и оптимизируется монолитная цепь. Как показано выше, структура идеальной цепи, обеспечивающая наилучшие характеристики, вовсе не обязательно ведет к оптимальной монолитной цепи.

При использовании декомпозиционного метода синтеза [8] процедура может быть распространена на проектирование активных полупроводниковых устройств, содержащих КЦ и СЦ. Для этого требования к характеристикам устройства преобразуются в ОДЗ иммитанса или коэффициента отражения КЦ и СЦ, затем по полученным ОДЗ осуществляется синтез самих цепей.

Работа поддержана грантами РФФИ № 06-07-96916, INTAS № 06-1000016-6390 для молодых исследователей и INTAS-CNES №06-1000024-9199.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Babak L.I., Cherkashin M.V. Interactive «visual» design of matching and compensation networks for microwave active circuits // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. – 2001. – V. 3. – P. 2095–2098.
2. Бабак Л.И., Черкашин М.В., Зайцев Д.А. Интерактивная процедура «визуального» проектирования корректирующих и согласующих цепей полупроводниковых СВЧ устройств // Электронные средства и системы управления: Матер. Междунар. научно-практ. конф. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2004. – Ч. 1. – С. 45–49.
3. Бабак Л.И. Синтез и оптимизация монолитных интегральных СВЧ-устройств на основе преобразования моделей пассивных элементов // Электронные средства и системы управления: Матер. Междунар. научно-практ. конф. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2004. – Ч. 1 – С. 66–70.
4. Бабак Л.И. Синтез согласующих цепей и цепей связи транзисторных широкополосных усилителей по областям иммитанса // Радиотехника и электроника. – 1995. – Т. 40. – Вып. 10. – № 8. – С. 1550–1560.
5. Бабак Л.И., Шеерман Ф.И., Черкашин М.В. Автоматическое вычисление геометрических размеров пассивных элементов СВЧ монолитных схем по электрическим параметрам // Электронные средства и системы управления: Матер. Междунар. научно-практ. конф. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2004. – Ч. 1 – С. 40–44.
6. Бабак Л.И., Черкашин М.В., Зайцев Д.А. Программа «визуального» проектирования корректирующих и согласующих цепей СВЧ устройств // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2005): Труды XV Междунар. Крымской конф. – Севастополь: Вебер, 2005. – Т. 2. – С. 423–424.
7. Черкашин М.В. Интерактивный расчет широкополосных согласующих цепей // 2-й Межд. симпозиум СИБКОНВЕРС'97: Труды симпозиума. – Томск: ТУСУР, 1997. – С. 131–138.
8. Babak L.I. Decomposition synthesis approach to design of RF and microwave active circuits // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest. – 2001. – V. 2. – P. 1167–1170.